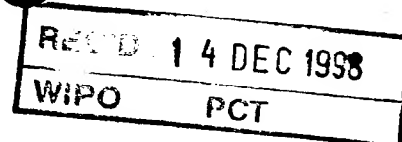


00/856710

FR98/02563



PCT/FR98/02563



BREVET D'INVENTION

CERTIFICAT D'UTILITÉ - CERTIFICAT D'ADDITION

PRIORITY DOCUMENT

SUBMITTED OR TRANSMITTED IN
COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)

COPIE OFFICIELLE

Le Directeur général de l'Institut national de la propriété industrielle certifie que le document ci-annexé est la copie certifiée conforme d'une demande de titre de propriété industrielle déposée à l'Institut.

Fait à Paris, le 04 SEP. 1998

Pour le Directeur général de l'Institut
national de la propriété industrielle
Le Chef du Département des brevets

Martine PLANCHE

INSTITUT
NATIONAL DE
LA PROPRIÉTÉ
INDUSTRIELLE

SIEGE
26 bis, rue de Saint Petersburg
75800 PARIS Cedex 08
Téléphone : 01 53 04 53 04
Télécopie : 01 42 93 59 30



REQUÊTE EN DÉLIVRANCE

Confirmation d'un dépôt par télécopie ☐

Cet imprimé est à remplir à l'encre noire en lettres capitales

26 bis, rue de Saint Pétersbourg
75800 Paris Cedex 08
Téléphone : 01 53 04 53 04 Télécopie : 01 42 93 59 30

Réserve à l'INPI

DATE DE REMISE DES PIÈCES

27. NOV 1997

N° D'ENREGISTREMENT NATIONAL

97 14947-

DÉPARTEMENT DE DÉPÔT 75

DATE DE DÉPÔT

27/11/97

2 DEMANDE Nature du titre de propriété industrielle

☒ brevet d'invention

☐ demande divisionnaire

☐ certificat d'utilité

☐ transformation d'une demande de brevet européen

☐ demande initiale

☐ brevet d'invention

☐ certificat d'utilité n°

date

Établissement du rapport de recherche

☐ différé

☒ immédiat

Le demandeur, personne physique, requiert le paiement échelonné de la redevance

☐ oui

☒ non

Titre de l'invention (200 caractères maximum)

Moyens pour la génération de rayonnements optiques accordables au moins en fréquence

3 DEMANDEUR (S)

n° SIREN

code APE-NAF

Nom et prénoms (souligner le nom patronymique) ou dénomination

UNIVERSITE DE BOURGOGNE

Forme juridique

Nationalité (s) Française

Adresse (s) complète (s)

Maison de l'Université

Esplanade Erasme

21000 DIJON

Pays

FRANCE

4 INVENTEUR (S) Les inventeurs sont les demandeurs

☐ oui

☒ non

Si la réponse est non, fournir une désignation séparée

5 RÉDUCTION DU TAUX DES REDEVANCES

☐ requise pour la 1ère fois

☐ requise antérieurement au dépôt ; joindre copie de la décision d'admission

6 DÉCLARATION DE PRIORITÉ OU REQUÊTE DU BÉNÉFICE DE LA DATE DE DÉPÔT D'UNE DEMANDE ANTÉRIEURE

pays d'origine

numéro

date de dépôt

nature de la demande

7 DIVISIONS antérieures à la présente demande n°

date

n°

date

8 SIGNATURE DU DEMANDEUR OU DU MANDATAIRE

(nom et qualité du signataire - n° d'inscription)

Mandataire : Alain ARMENGAUD

n° 92-1003

SIGNATURE DU PRÉPOSÉ À LA RÉCEPTION

SIGNATURE APRÈS ENREGISTREMENT DE LA DEMANDE À L'INPI

DÉSIGNATION DE L'INVENTEUR

(si le demandeur n'est pas l'inventeur ou l'unique inventeur)

DIVISION ADMINISTRATIVE DES BREVETS

26bis, rue de Saint-Petersbourg
75800 Paris Cédex 08
Tél. : 01 53 04 53 04 - Télécopie : 01 42 93 59 30

N° D'ENREGISTREMENT NATIONAL

9714947

TITRE DE L'INVENTION : Moyens pour la génération de rayonnements optiques
accordables au moins en fréquence

LE(S) SOUSSIGNÉ(S) Monsieur Alain ARMENGAUD

DÉSIGNE(NT) EN TANT QU'INVENTEUR(S) (indiquer nom, prénoms, adresse et souligner le nom patronymique) :

BOULANGER Benoit
17 Allée Sicardet
21121 FONTAINE LES DIJON

FEVE Jean-Philippe
35 rue Jacques Cellerier
21000 DIJON

MENAERT Bertrand
Lycée Léonard de Vinci
21130 AUXONNE

MARTEL Gérard
14 rue Edouard Herriot
21240 TALANT

NOTA : A titre exceptionnel, le nom de l'inventeur peut être suivi de celui de la société à laquelle il appartient (société d'appartenance) lorsque celle-ci est différente de la société déposante ou titulaire.

Date et signature (s) du (des) demandeur (s) ou du mandataire

Le 26 Novembre 1997

n° 92-1003

La présente invention est, de manière générale, relative à un dispositif et une méthode pour la génération de rayonnements optiques accordables au moins en fréquence.

Les dispositifs et méthodes actuellement disponibles pour la conversion de fréquence par interaction optique non linéaire en accord de phase par biréfringence utilisent des monocristaux de forme parallélépipédique. L'orientation des faces est choisie en fonction de l'interaction souhaitée. Ainsi dans la plupart des cas, comme pour la génération de second harmonique par exemple, un cristal n'est utilisable que pour une interaction donnée, c'est-à-dire pour un doublet de fréquence (ν , 2ν) particulier dont la direction d'accord de phase associée est orthogonale aux faces polies. Il existe néanmoins des dispositifs à base de cristaux parallélépipédiques qui utilisent l'accordabilité en angle pour l'amplification ou l'oscillation paramétrique par exemple. Du fait des pertes induites par la réfraction et la non-colinéarité des vecteurs d'ondes en incidence oblique, il n'y a qu'une faible plage angulaire du cristal qui peut être utilisée, typiquement une dizaine de degrés en angle externe de part et d'autre des directions orthogonales aux deux faces parallèles soumises au rayonnement. Un tel écart angulaire n'est pas toujours suffisant pour accéder à la totalité des directions d'accord de phase existantes. D'autre part la réfraction en incidence oblique conduit à une déformation des faisceaux générés.

Les dispositifs actuellement disponibles pour la conversion de fréquence par interaction optique non linéaire en quasi-accord de phase utilisent la translation par rapport au rayonnement d'un échantillon parallélépipédique dans lequel ont été gravés plusieurs réseaux de différentes périodicités. L'inconvénient majeur de cette technique est qu'il est nécessaire de réaliser pour chaque saut d'un réseau à l'autre, un accord angulaire ou thermique afin de rendre continue la plage spectrale du

rayonnement généré.

Ceci est valable que l'interaction soit résonante ou non, c'est-à-dire que l'échantillon soit placé dans une cavité ou non.

5 La présente invention vise à pallier les inconvénients des dispositifs et techniques de l'art antérieur et propose un dispositif pour la génération, par interaction(s) à trois ou quatre ondes à partir d'un ou plusieurs rayonnement(s) optique(s) incident(s), d'un ou plusieurs
10 rayonnement(s) optique(s) émergent(s) accordable(s) au moins en fréquence, caractérisé en ce qu'il est essentiellement constitué par un cristal à propriété optique non linéaire dont la surface définit un volume cylindrique de révolution de manière complète, ou bien de
15 manière partielle (ou tronquée) sur des cadrans opposés et symétriques par rapport à son axe de révolution.

Par volume cylindrique de révolution, on entend dans la présente demande un volume de révolution décrit par un segment de droite ou de courbe se déplaçant le long de deux
20 courbes fermées situées dans des plans parallèles.

Ledit cristal présente, au moins sur ses surfaces utiles, un état de surface approprié à la réalisation d'interactions optiques. En particulier, la (les)
surface(s) dudit cristal qui définisse(ent) un volume
25 cylindrique de révolution est (sont) optiquement polie(es).

Le terme "rayonnement optique" se réfère dans la présente demande à un faisceau d'ondes électromagnétiques dont la ou les fréquence(s) appartient (appartiennent) au spectre ultra-violet et/ou visible et/ou infrarouge. La
30 valeur de cette ou ces fréquence(s) est comprise entre 1 et 15 000 nanomètres environ, et, plus particulièrement entre 100 et 10 000 nanomètres environ.

Par propriété optique non linéaire, on entend dans la présente demande une propriété de conversion de fréquence
35 optique et/ou une propriété électro-optique.

Le dispositif selon l'invention présente notamment

l'avantage de permettre, avec un seul cristal, la
génération de rayonnements d'une meilleure qualité spatiale
et sur une plus grande plage spectrale que ne le permettent
les dispositifs actuellement disponibles. Le dispositif
5 selon l'invention présente également les avantages de la
simplicité mécanique, et de ne pas nécessiter de milieu
d'adaptation d'indice : ledit cristal peut être placé à
l'air libre, ou dans tout milieu d'indice quelconque.

Ledit cristal peut par exemple présenter un volume
10 choisi parmi le groupe constitué par un volume de cylindre,
un volume de cylindroïde, un volume de cylindre partiel (ou
tronqué) présentant au moins deux cadrans de volume
cylindrique de révolution opposés et symétriques par
rapport à l'axe de révolution dudit cristal.

15 En effet, compte-tenu de la symétrie de la surface des
indices d'un cristal, une rotation de $\Delta\alpha = 90^\circ$ par rapport
à un axe principal de la surface des indices peut être
suffisante pour accéder aux interactions recherchées. Il
peut donc alors n'être usiné que deux cadrans cylindriques
20 opposés correctement orientés, symétriques par rapport à
l'axe de rotation, voire deux portions de cadrans dont
l'écart angulaire $\Delta\alpha$ permet la propagation des différentes
interactions recherchées.

Le dispositif selon l'invention est particulièrement
25 adapté aux cristaux qui comportent au moins une entité
chimique hyperpolarisable. Ledit cristal est
préférentiellement un cristal choisi parmi le groupe
constitué par un cristal de KTiOPO_4 , de KTiOAsO_4 , de
 RbTiOPO_4 , de RbTiOAsO_4 , de CsTiOAsO_4 , de $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$, de LiB_3O_5 ,
30 de KNbO_3 , de LiIO_3 , de LiNbO_3 , de LiTaO_3 , de KD_2PO_4 , de
 KH_2PO_4 , de $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, de CsD_2AsO_4 , de CsH_2AsO_4 , de AgGaS_2 , de
 AgGaSe_2 , de ZnGeP_2 , de Tl_3AsSe_3 et un cristal de GaAs . La
taille dudit cristal est avantageusement choisie parmi le
groupe constitué par une taille micrométrique, une taille
35 millimétrique et une taille centrimétrique.

Selon un aspect avantageux de l'invention, ledit dispositif comprend en outre un système optique permettant d'une part de confiner et de focaliser ledit (lesdits) rayonnement(s) optique(s) incident(s) sur la partie
5 centrale dudit cristal, et permettant d'autre part de collimater et de diriger ledit (lesdits) rayonnement(s) optique(s) émergent(s).

Selon une disposition de cet aspect avantageux, ledit système optique est essentiellement constitué par deux
10 éléments placés de part et d'autre dudit cristal et choisis parmi le groupe constitué par une lentille convergente, une lentille divergente, un ensemble de lentilles, une surface réfléchissante ou un miroir avec la concavité orientée du côté dudit cristal, et une surface réfléchissante ou un
15 miroir avec la concavité orientée du côté opposé dudit cristal. Ils sont choisis de manière à présenter une focale et une géométrie telles, et de manière à pouvoir être respectivement placés à une distance focale telle qu'un premier d'entre eux est capable de focaliser un rayonnement
20 laser incident sur ledit cristal, et qu'un deuxième d'entre eux est capable de diminuer la divergence du rayonnement laser émergent du cristal.

La distance focale desdits éléments est telle que le (ou les) rayonnement(s) a (ont) une dimension faible par
25 rapport au rayon dudit cristal pour limiter les aberrations optiques et augmenter l'efficacité d'interaction, et que cette dimension soit suffisante pour éviter un endommagement du cristal par une intensité incidente trop importante. Cette distance focale est généralement comprise
30 entre 50 et 500mm environ.

Selon un autre aspect avantageux de l'invention, l'axe de révolution dudit cristal est confondu avec un axe mécanique rotatif de façon à ce que le cristal puisse tourner autour de son axe. Un tel cristal peut alors être
35 avantageusement solidarisé avec un dispositif goniométrique permettant de contrôler son déplacement angulaire.

Selon encore un autre aspect avantageux de l'invention, ledit cristal est un cristal à propriété d'accord de phase par biréfringence, tel qu'un cristal monocristallin, ou bien est un cristal à propriété de
5 quasi-accord de phase. Un dit cristal à propriété de quasi-accord de phase présente une juxtaposition périodiquement alternée de domaines monocristallins, c'est-à-dire une juxtaposition de couches monocristallines tournées d'un angle de 180° les unes par rapport aux autres. Un tel
10 cristal à propriété de quasi-accord de phase peut par exemple être obtenu par usinage et juxtaposition de monocristaux, ou bien encore par application d'un champ électrique à un réseau d'électrodes déposées sur les faces orthogonales à l'axe polaire d'un cristal ferroélectrique.
15 Il en résulte avantageusement un cristal dont le réseau présente un vecteur de périodicité orthogonal à l'axe de révolution dudit cristal, et qui présente un coefficient non linéaire effectif de signe périodiquement alterné selon des intervalles dépendants de la direction de propagation
20 considérée. L'interaction dont la longueur de cohérence est égale à une fraction impaire de la périodicité dans la direction de propagation considérée a alors une efficacité maximale.

Selon encore un autre aspect avantageux de
25 l'invention, l'axe de révolution dudit cristal est orthogonal au plan de la (ou des) direction(s) de vecteurs d'onde d'une interaction recherchée, et plus particulièrement de la (ou des) direction(s) permettant une efficacité maximale de cette interaction.

30 Selon un aspect particulièrement avantageux de l'invention, ledit cristal contient la (ou les) direction(s) de vecteurs d'onde d'une interaction recherchée, et en particulier la (ou les) direction(s) permettant une efficacité maximale de cette interaction, de
35 telle manière qu'elle(s) soit (soient) accessible(s) audit (auxdits) rayonnement(s) optique(s) incident(s) en

incidence normale sur une (des) surface(s) dudit cristal définissant un volume cylindrique de révolution, soit par rotation dudit cristal autour de son axe de révolution, soit par rotation dudit (desdits) rayonnement(s) optique(s) incident(s) autour dudit cristal dans un plan orthogonal à l'axe de révolution dudit cristal. Cet aspect particulièrement avantageux de l'invention permet, dans le cas dudit cristal à propriété d'accord de phase par biréfringence, de n'utiliser qu'un seul cristal au lieu d'une pluralité de cristaux parallélépipédiques et dans le cas dudit cristal à propriété de quasi-accord de phase, d'utiliser un cristal gravé d'un seul réseau au lieu d'un cristal parallélépipédique gravé d'une pluralité de réseaux. Un autre aspect particulièrement avantageux de l'invention est qu'elle permet, dans le cas dudit cristal à propriété d'accord de phase par biréfringence, d'une part d'obtenir une accordabilité sur un plus grand domaine spectral et, d'autre part de limiter les phénomènes d'atténuation et de déformation de faisceaux qui peuvent être observés en incidence oblique, et dans le cas dudit cristal à propriété de quasi-accord de phase, d'obtenir une accordabilité plus continue.

Selon un mode de réalisation de l'invention, ledit (lesdits) rayonnement(s) optique(s) incident(s) comprend (comprennent chacun) une, deux, trois ou quatre fréquence(s) égales ou différentes, à vecteurs d'onde colinéaires ou non colinéaires, et en incidence normale sur une (des) surface(s) dudit cristal définissant un volume cylindrique de révolution. De tels rayonnements peuvent notamment être générés par une source de rayonnements électromagnétiques associée audit dispositif.

Préférentiellement, ledit (ou lesdits) rayonnement(s) optique(s) incident(s) est (sont des) un rayonnement(s) laser, tel qu'un rayonnement émis par un laser à gaz (hélium-néon, argon ionisé, azote et dioxyde de carbone, excimères), un laser solide (rubis, ions néodyme), un laser

liquide à colorant, un laser à semiconducteurs (arséniure de gallium), un laser à électrons libres. Il peut notamment s'agir d'un (ou de) rayonnement(s) laser choisi(s) parmi le groupe constitué par un rayonnement laser comportant une
5 (des) fréquence(s) fixe(s) et un rayonnement laser comportant une (des) fréquence(s) accordable(s).

Le dispositif selon l'invention est notamment approprié à la réalisation d'interaction(s) à trois ondes ou à quatre ondes. De telle sorte que ledit dispositif
10 permette une (des) interaction(s) à trois ondes, ledit cristal présente avantageusement une structure non centrosymétrique.

Selon un autre mode de réalisation de l'invention, ledit (ou au moins un desdits) rayonnement(s) optique(s)
15 incident(s) comprend deux fréquences pour une interaction à trois ondes, ou trois fréquences pour une interaction à quatre ondes, et ledit (ou au moins un desdits) rayonnement(s) optique(s) émergent(s) comprend une fréquence qui correspond à la somme desdites deux, ou le
20 cas échéant trois fréquences comprises dans ledit (lesdits) rayonnement(s) optique(s) incident(s).

Selon encore un autre mode de réalisation de l'invention, ledit (ou au moins un desdits) rayonnement(s) optique(s) émergent(s) comprend une fréquence égale à un
25 multiple, et notamment au double ou au triple d'une fréquence comprise dans ledit (ou au moins un desdits) rayonnement(s) optique(s) incident(s).

Selon encore un autre mode de réalisation de l'invention, ledit (ou au moins un desdits) rayonnement(s)
30 optique(s) incident(s) comprend deux fréquences pour une interaction à trois ondes, ou trois fréquences pour une interaction à quatre ondes, et ledit (ou au moins un desdits) rayonnement(s) optique(s) émergent(s) comprend une fréquence qui correspond à une différence entre lesdites
35 deux, ou le cas échéant trois fréquences comprises dans ledit (lesdits) rayonnement(s) optique(s) incident(s).

Selon encore un autre mode de réalisation de l'invention, ledit (ou au moins un desdits) rayonnement(s) optique(s) émergent(s) comprend deux fréquences pour une interaction à trois ondes, ou trois fréquences pour une
5 interaction à quatre ondes, dont la somme est égale à une fréquence comprise dans ledit (ou au moins un desdits) rayonnement(s) optique(s) incident(s).

Ladite (ou au moins une desdites) interaction(s) peut être une interaction à vecteurs d'ondes colinéaires, ou
10 bien une interaction à vecteurs d'ondes non colinéaires.

Ladite (ou au moins une desdites) interaction(s) est préférentiellement une interaction choisie parmi le groupe constitué par une amplification paramétrique optique et une génération de second ou tierce harmonique. Le dispositif
15 selon l'invention fonctionne alors en tant qu'amplificateur paramétrique optique, ou respectivement, en tant que générateur de second ou tierce harmonique.

Selon un mode avantageux de réalisation de l'invention, ledit cristal est placé à l'intérieur d'une
20 cavité permettant une interaction résonante. Cette interaction résonante peut notamment être une interaction à trois ou quatre ondes choisie parmi le groupe constitué par une oscillation paramétrique optique, une amplification paramétrique optique et une génération de second ou tierce
25 harmonique. La disposition dudit cristal à l'intérieur de ladite cavité est nécessaire à la réalisation d'une oscillation paramétrique optique, mais est facultative à la réalisation d'une amplification paramétrique optique ou d'une génération de second ou tierce harmonique. Dans ce
30 dernier cas, elle vise en effet à augmenter les rendements de génération. Le dispositif selon l'invention peut alors fonctionner respectivement en tant qu'oscillateur paramétrique optique, ou en tant qu'amplificateur paramétrique optique, ou en tant que générateur de second
35 ou tierce harmonique.

Selon un aspect de ce mode avantageux de réalisation,

ladite cavité comporte au moins une surface réfléchissante entrée (recevant le ou les rayonnement(s) incident(s)) et au moins une surface réfléchissante sortie (recevant le ou les rayonnement(s) émergent(s)) en regard l'une de l'autre permettant la résonance d'au moins une des ondes en interaction. La géométrie de ladite cavité est définie en fonction des propriétés spécifiques de réfraction des dioptries à volume cylindrique de révolution de cristaux à propriétés optiques anisotropes, en particulier vis-à-vis de l'angle de double réfraction ρ , l'angle entre le vecteur de Poynting et le vecteur d'onde. Les coefficients de réflexion des surfaces réfléchissantes entrée et sortie sont tels que la cavité puisse être résonante soit à une, soit à deux, soit à trois, soit, le cas échéant, à quatre ondes en interaction.

En particulier ladite surface réfléchissante entrée est choisie parmi le groupe constitué par une surface réfléchissante plane et une surface réfléchissante présentant un rayon de courbure, avec la concavité choisie parmi le groupe constitué par une concavité orientée du côté dudit cristal et une concavité orientée du côté opposé, de manière à optimiser le seuil d'oscillation et la stabilité de la cavité. La distance entre la surface réfléchissante entrée et ledit cristal est adaptée de façon à réaliser la (les) résonance(s) recherchée(s).

Si au moins une des ondes en résonance a un angle de double réfraction ρ non nul, ladite surface réfléchissante sortie est placée à une distance d dudit cristal et présente un rayon de courbure R , avec une concavité choisie parmi le groupe constitué par une concavité orientée du côté dudit cristal et une concavité orientée du côté opposé dudit cristal, de façon à ce que les faisceaux aller et retour de l'onde (ou des ondes) en résonance soient confondus. Les valeurs de d et de R répondent avantageusement à l'équation $R = d - L$ avec d supérieur à L pour une concavité orientée du côté dudit cristal, ou à

l'équation $R = L - d$ avec d inférieur à L pour une concavité orientée du côté opposé dudit cristal, avec L défini par $L = R_c (\cos(2p) + (\sin(2p) / \tan(p_e)) - 1)$, avec R_c étant le rayon du volume cylindrique de révolution, p l'angle de double réfraction, et avec p_e défini par $p_e = \arcsin(n \sin(2p) - 2p)$, avec n l'indice de réfraction de ladite au moins une onde dont la résonance est recherchée.

Pour des ondes résonantes présentant un angle de double réfraction p nul, ladite surface réfléchissante sortie peut en particulier être choisie parmi une surface réfléchissante plane et une surface réfléchissante présentant un rayon de courbure, avec la concavité choisie parmi le groupe constitué par une concavité orientée du côté dudit cristal et une concavité orientée du côté opposé, de manière à optimiser le seuil d'oscillation et la stabilité de la cavité. La distance entre la surface réfléchissante sortie et ledit cristal est adaptée de façon à réaliser la (les) résonance(s) recherchée(s).

Selon un autre mode de réalisation avantageux de l'invention, ledit dispositif comprend en outre des moyens pour le contrôle thermostatique dudit cristal. De tels moyens permettent notamment de stabiliser l'efficacité des interactions ou d'étendre la gamme spectrale accessible. Ledit cristal est alors avantageusement maintenu à une température inférieure ou supérieure de la température ambiante.

Selon encore un autre mode de réalisation avantageux de l'invention, ledit dispositif comprend en outre des moyens permettant d'appliquer un champ électrique statique ou de basse fréquence à l'intérieur dudit cristal.

La géométrie du cristal, élément du dispositif selon l'invention, permet en effet aisément de coupler au rayonnement laser un champ électrique statique ou de basse fréquence pour moduler l'efficacité des interactions ou pour modifier, et en particulier augmenter, la gamme

spectrale accessible (via l'effet électro-optique). Ledit dispositif peut ainsi en outre comprendre une paire d'électrodes placées sur des faces opposées dudit cristal.

Le dispositif selon l'invention présente de nombreuses applications, en particulier les applications civiles ou militaires des rayonnements optiques accordables en fréquence. Il constitue ainsi de manière avantageuse, un élément choisi parmi le groupe constitué par un élément de spectroscope, un élément de système de télédétection, un élément de système de télétransmission, un élément de système de téléguidage, un élément de système LIDAR (*Light Detection And Ranging*), un élément de système de contre-mesures optroniques.

La présente invention vise également une méthode pour la génération d'un ou plusieurs rayonnement(s) optique(s) accordable(s) au moins en fréquence, caractérisé en ce qu'elle met en œuvre un dispositif selon l'invention.

Une méthode avantageuse selon l'invention comprend notamment :

i. générer un ou plusieurs rayonnement(s) optique(s) comprenant chacun une ou plusieurs composante(s) spectrale(s),

ii. diriger ledit (ou lesdits) rayonnement(s) optique(s) en tant que rayonnement(s) optique(s) incident(s) vers un dit cristal en incidence normale sur une (des) surface(s) dudit cristal définissant (indépendamment les unes des autres) un volume cylindrique de révolution, de manière à générer hors dudit cristal

- une fréquence correspondant soit à un multiple (double, triple) d'une fréquence dudit (ou desdits) rayonnement(s) incident(s), soit à la somme de, ou à une différence entre des fréquences dudit (ou desdits) rayonnement(s) incident(s), ou bien encore

- plusieurs fréquences dont la somme correspond à une fréquence comprise dans ledit (lesdits) rayonnement(s) optique(s) incident(s),

iii. le cas échéant, répéter les points i. et ii. ci-dessus après rotation appropriée dudit cristal autour de son axe de révolution ou rotation dudit (desdits) rayonnement(s) optique(s) incident(s) autour dudit cristal
5 dans un plan orthogonal à l'axe de révolution dudit cristal.

Selon un mode de mise en oeuvre préféré de cette méthode avantageuse selon l'invention, ledit (ou au moins un desdits) rayonnement(s) optique(s) incident(s) est un
10 rayonnement laser choisi parmi le groupe constitué par un rayonnement laser comportant une (des) fréquence(s) fixe(s) et un rayonnement laser comportant une (des) fréquence(s) accordable(s).

Un mode de réalisation particulièrement préféré de
15 cette méthode avantageuse selon l'invention comprend en outre l'application d'un champ électrique à l'intérieur dudit cristal, de manière à produire un effet électro-optique.

Dans la présente demande, il est fait référence aux
20 figures 1 à 9 :

- la figure 1 représente le système d'axes orthonormés (x, y, z) et les coordonnées sphériques (θ, Φ) d'une direction quelconque,

- la figure 2 illustre différentes formes 1,2,3,4 de
25 réalisation d'un cristal faisant partie du dispositif selon l'invention, les surfaces hachurées représentent les surfaces dudit cristal sur lesquelles peuvent avantageusement être placées des électrodes (effet électro-optique),

30 - la figure 3 représente un dispositif selon l'invention comprenant, placé entre deux lentilles L_1 et L_2 , un cristal à propriété optique non linéaire 1 présentant un volume cylindrique de révolution de manière complète,

- la figure 4 représente un dispositif selon
35 l'invention comprenant, placé entre deux lentilles L_1 et L_2 , un cristal à propriété optique non linéaire 3 présentant

un volume cylindrique de révolution de manière partielle (ou tronquée) sur deux cadrans d'écart angulaire $\Delta\alpha$ opposés et symétriques,

- la figure 5 représente un dispositif selon l'invention comprenant, placé entre trois couples de lentilles (L_{1i} , L_{1e}), (L_{2i} , L_{2e}), et (L_{3i} , L_{3e}), un cristal à propriété optique non linéaire 1 présentant un volume cylindrique de révolution de manière complète,

- la figure 6, représente un dispositif selon l'invention comprenant un cristal à propriété optique non linéaire 1 placé entre deux lentilles L_1 et L_2 , et placé à l'intérieur d'une cavité présentant deux surfaces réfléchissantes (ou miroirs) entrée et sortie permettant la résonance de l'onde à vecteurs de Poynting P_1 ,

- les figures 7 et 8 représentent un dispositif selon l'invention comprenant un cristal à propriété optique non linéaire 1 placé entre deux lentilles L_1 et L_2 et placé à l'intérieur d'une cavité présentant deux surfaces réfléchissantes (ou miroirs) entrée et sortie permettant la résonance de deux ondes à vecteurs d'ondes de Poynting respectifs P_1 et P_2 ; sur la figure 7, le miroir d'entrée est plan, le miroir de sortie présente un rayon de courbure R avec la concavité du côté du cristal 1; sur la figure 8, le miroir d'entrée est plan, le miroir de sortie présente un rayon de courbure R avec la concavité du côté opposé au cristal 1,

- la figure 9 représente un dispositif selon l'invention comprenant, placé entre deux lentilles L_1 et L_2 , un cristal à propriété optique non linéaire 1 présentant un volume cylindrique de révolution de manière complète et présentant le long de la direction de propagation d'une interaction recherchée, un coefficient non linéaire effectif de signe alterné (+, -) selon le vecteur de périodicité V_Δ et avec une période Δ .

EXEMPLESExemple 1. Calcul des directions d'accord de phase par biréfringence

5 L'accord de phase par biréfringence permet l'optimisation de l'efficacité des interactions paramétriques optiques. Dans le cas des cristaux où la dispersion en pulsation ($\omega = 2\pi\nu$ où ν est la fréquence) des indices (n) de réfraction est dite "normale", à savoir $n(\omega_i) < n(\omega_j)$ lorsque $\omega_i < \omega_j$, et
 10 pour des interactions où les vecteurs d'ondes des ondes couplées sont colinéaires, les différentes relations d'accord de phase possibles sont les suivantes :

- pour les interactions à 3 ondes de pulsations ω_1 , ω_2 et ω_3
 15 (avec $\omega_1 + \omega_2 = \omega_3$)

$$\omega_1 n^+(\omega_1, \theta, \phi) + \omega_2 n^+(\omega_2, \theta, \phi) = \omega_3 n^-(\omega_3, \theta, \phi) \quad (1a)$$

$$\omega_1 n^+(\omega_1, \theta, \phi) + \omega_2 n^-(\omega_2, \theta, \phi) = \omega_3 n^-(\omega_3, \theta, \phi) \quad (1b)$$

$$\omega_1 n^-(\omega_1, \theta, \phi) + \omega_2 n^+(\omega_2, \theta, \phi) = \omega_3 n^-(\omega_3, \theta, \phi) \quad (1c)$$

20

- pour les interactions à 4 ondes de pulsations ω_1 , ω_2 , ω_3 et ω_4 (avec $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = \omega_4$)

$$\begin{aligned} \omega_1 n^+(\omega_1, \theta, \phi) + \omega_2 n^+(\omega_2, \theta, \phi) + \omega_3 n^+(\omega_3, \theta, \phi) &= \omega_4 n^-(\omega_4, \theta, \phi) \\ \omega_1 n^+(\omega_1, \theta, \phi) + \omega_2 n^-(\omega_2, \theta, \phi) + \omega_3 n^-(\omega_3, \theta, \phi) &= \omega_4 n^-(\omega_4, \theta, \phi) \\ 25 \quad \omega_1 n^-(\omega_1, \theta, \phi) + \omega_2 n^+(\omega_2, \theta, \phi) + \omega_3 n^-(\omega_3, \theta, \phi) &= \omega_4 n^-(\omega_4, \theta, \phi) \\ \omega_1 n^-(\omega_1, \theta, \phi) + \omega_2 n^-(\omega_2, \theta, \phi) + \omega_3 n^+(\omega_3, \theta, \phi) &= \omega_4 n^-(\omega_4, \theta, \phi) \\ \omega_1 n^+(\omega_1, \theta, \phi) + \omega_2 n^+(\omega_2, \theta, \phi) + \omega_3 n^-(\omega_3, \theta, \phi) &= \omega_4 n^-(\omega_4, \theta, \phi) \\ \omega_1 n^+(\omega_1, \theta, \phi) + \omega_2 n^-(\omega_2, \theta, \phi) + \omega_3 n^+(\omega_3, \theta, \phi) &= \omega_4 n^-(\omega_4, \theta, \phi) \\ \omega_1 n^-(\omega_1, \theta, \phi) + \omega_2 n^+(\omega_2, \theta, \phi) + \omega_3 n^+(\omega_3, \theta, \phi) &= \omega_4 n^-(\omega_4, \theta, \phi) \end{aligned} \quad (2)$$

30 Pour des interactions où les vecteurs d'onde des ondes couplées sont non colinéaires, les combinaisons d'indices de réfraction n^+ et n^- sont identiques aux cas colinéaires mais avec des coefficients différents : pour les interactions à 3 ondes, ω_1 est remplacé par $\omega_1 \cos [\alpha_{13}(\theta, \Phi)]$

et ω_2 est remplacé par $\omega_2 \cos [\alpha_{23}(\theta, \Phi)]$; pour les interactions à 4 ondes, ω_1 est remplacé par $\omega_1 \cos [\alpha_{14}(\theta, \Phi)]$, ω_2 est remplacé par $\omega_2 \cos [\alpha_{24}(\theta, \Phi)]$ et ω_3 est remplacé par $\omega_3 \cos [\alpha_{34}(\theta, \Phi)]$, avec α_{ij} étant l'angle entre les vecteurs d'onde à ω_i et ω_j ($i = 1$ ou 2 si $j = 3$; $i = 1$ ou 2 ou 3 si $j = 4$). Par exemple, dans le cas des interactions à 3 ondes, la projection des relations vectorielles d'accord de phase sur la direction du vecteur d'ondes k_3 transforme la relation (1a) en :

10

$$\omega_1 \cos[\alpha_{13}(\theta, \phi)] n^+(\omega_1, \theta, \phi) + \omega_2 \cos[\alpha_{23}(\theta, \phi)] n^+(\omega_2, \theta, \phi) = \omega_3 n^-(\omega_3, \theta, \phi) \quad (3)$$

ou α_{13} (α_{23}) sont les angles entre les vecteurs d'ondes à ω_1 et ω_3 (ω_2 et ω_3) respectivement. (θ, ϕ) sont les coordonnées sphériques de la direction d'accord de phase considérée dans le repère optique (x, y, z) qui est liée au cristal non linéaire. La figure 1 illustre la disposition des axes (x, y, z) et les coordonnées sphériques (θ, ϕ) d'une direction quelconque. Les coordonnées sphériques (θ, ϕ) sont reliées aux coordonnées cartésiennes (U_x, U_y, U_z) par :

20

$$u_x = \cos\phi \sin\theta ; u_y = \sin\phi \sin\theta ; u_z = \cos\theta$$

25 $n^+(\omega, \theta, \phi)$ et $n^-(\omega, \theta, \phi)$ sont les solutions de l'équation de Fresnel et sont données par :

$$n^{\pm} = \left(\frac{2}{-B \pm (B^2 - 4C)^{1/2}} \right)^{1/2} \quad (4)$$

30

$$\begin{aligned} B &= -u_x^2(b+c) - u_y^2(a+c) - u_z^2(a+b) & C &= u_x^2 bc + u_y^2 ac + u_z^2 ab \\ a &= n_x^{-2}(\omega), & b &= n_y^{-2}(\omega), & c &= n_z^{-2}(\omega) \end{aligned}$$

La surface $n^{\pm}(\theta, \phi)$ est appelée surface des indices. $n_x(\omega)$, $n_y(\omega)$ et $n_z(\omega)$ sont les indices principaux de réfraction à

la pulsation ω . Les indices principaux de réfraction aux pulsations des ondes en interaction sont des paramètres nécessaires à la résolution des équations d'accord de phase (1), (2) et (3) ; ils sont donnés par des équations de Sellmeier à 4,5 ou 6 coefficients. Les équations de Sellmeier des cristaux ci-après considérés dans les exemples 2, 3, 5 et 6 sont données ici à température ambiante. Elles sont déterminées à partir de plusieurs mesures d'indices de réfraction à différentes longueurs d'ondes λ (λ est exprimé en μm dans les équations (5) à (11)).

KTiOPO₄ :

15

$$\begin{aligned} n_x^2(\lambda) &= 2.1239 + \frac{0.14274 \lambda^2}{\lambda^2 - 18.477} + \frac{0.87370 \lambda^2}{\lambda^2 - 0.045906} \\ n_y^2(\lambda) &= 2.0649 + \frac{0.15529 \lambda^2}{\lambda^2 - 19.373} + \frac{0.95463 \lambda^2}{\lambda^2 - 0.045505} \\ n_z^2(\lambda) &= 1.6539 + \frac{0.34767 \lambda^2}{\lambda^2 - 29.378} + \frac{1.6482 \lambda^2}{\lambda^2 - 0.038825} \end{aligned} \quad (5)$$

20 ***RbTiOPO₄*** :

$$\begin{aligned} n_x^2(\lambda) &= 2.15559 + \frac{0.93307 \lambda^2}{\lambda^2 - 0.044075} - 0.01452 \lambda^2 \\ n_y^2(\lambda) &= 2.38494 + \frac{0.73603 \lambda^2}{\lambda^2 - 0.057078} - 0.01583 \lambda^2 \\ n_z^2(\lambda) &= 2.27723 + \frac{1.11030 \lambda^2}{\lambda^2 - 0.055009} - 0.01995 \lambda^2 \end{aligned} \quad (6)$$

25

RbTiOAsO₄ :

$$\begin{aligned} n_x^2(\lambda) &= 2.04207 + \frac{1.17785 \lambda^2}{\lambda^2 - 0.040630} - 0.01035 \lambda^2 \\ n_y^2(\lambda) &= 2.14941 + \frac{1.09267 \lambda^2}{\lambda^2 - 0.046062} - 0.01067 \lambda^2 \\ n_z^2(\lambda) &= 2.18962 + \frac{1.30103 \lambda^2}{\lambda^2 - 0.052025} - 0.01390 \lambda^2 \end{aligned} \quad (7)$$

30

35

$$\begin{aligned}
 \text{CsTiOAsO}_4 : \quad n_x^2(\lambda) &= 2.34498 + \frac{1.04863 \lambda^2}{\lambda^2 - 0.048594} - 0.01483 \lambda^2 \\
 n_y^2(\lambda) &= 2.74440 + \frac{0.70733 \lambda^2}{\lambda^2 - 0.067772} - 0.01526 \lambda^2 \\
 n_z^2(\lambda) &= 2.53666 + \frac{1.10600 \lambda^2}{\lambda^2 - 0.062440} - 0.01711 \lambda^2
 \end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned}
 \text{KTiOAsO}_4 : \quad n_x^2(\lambda) &= 2.8049 + \frac{0.35190 \lambda^2}{\lambda^2 - 0.098915} - \frac{0.27186 \lambda^2}{\lambda^2 + 15.798} \\
 n_y^2(\lambda) &= 2.8077 + \frac{0.37614 \lambda^2}{\lambda^2 - 0.093917} - \frac{0.22531 \lambda^2}{\lambda^2 + 8.6981} \\
 n_z^2(\lambda) &= 3.8510 + \frac{0.81874 \lambda^2}{\lambda^2 - 86.976} - \frac{0.44017 \lambda^2}{\lambda^2 + 0.28229}
 \end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{aligned}
 \text{LiNbO}_3 : \quad n_o^2(\lambda) &= 4.9048 + \frac{0.11775}{\lambda^2 - 0.047533} - 0.027153 \lambda^2 \\
 n_e^2(\lambda) &= 4.5820 + \frac{0.09921}{\lambda^2 - 0.044479} - 0.021940 \lambda^2
 \end{aligned} \tag{10}$$

$$\begin{aligned}
 \text{LiTaO}_3 : \quad n_e^2(\lambda) &= 4.5284 + \frac{0.0095478}{\lambda^2 - 0.060858} + \frac{0.077690}{\lambda^2 - 0.033782} - 0.023670 \lambda^2 \\
 n_o^2(\lambda) &\text{ non mesuré (non sollicité)}
 \end{aligned} \tag{11}$$

Pour une interaction donnée, caractérisée par les pulsations des ondes en interaction, il existe un ensemble de directions d'accord de phase, c'est-à-dire de couples (θ, ϕ) qui sont solutions de la même équation d'accord de phase. De plus, ces différentes directions d'accord de phase ne sont pas équivalentes du point de vue de l'efficacité d'interaction. D'autre part, les directions d'accord de phase sont différentes d'une interaction à l'autre. Ainsi, un plan d'orientation quelconque contient un ensemble de directions d'accord de phase. Les plans intéressants pour la présente invention sont en particulier certains plans de symétrie de la surface des indices. Ces plans sont orthogonaux à l'axe de révolution du cylindre.

Pour un cristal uniaxe, défini par $n_x = n_y \neq n_z$, les plans utiles sont les plans orthogonaux au plan (xy), c'est-à-dire à angle ϕ constant : chacun de ces plans contient des directions d'accord de phase symétriques 2 à 2 par rapport à l'axe z, et chacun de ces couples correspond à une interaction particulière. Les différents plans, correspondant aux différentes valeurs de ϕ , présentent la même gamme spectrale d'accord de phase mais se distinguent par l'efficacité d'interaction.

Pour un cristal biaxe, défini par $n_x \neq n_y \neq n_z$, les trois plans principaux (xy), (xz) et (yz) sont intéressants. Le plan (xy) contient des directions d'accord de phase symétriques 2 à 2 par rapport à x et y, chacun des couples correspondant à une interaction spécifique. Les plans (xz) et (yz) possèdent la même symétrie que les plans d'un cristal uniaxe contenant l'axe z décrits précédemment. Les trois plans (xy), (xz) et (yz) du cristal biaxe ne présentent pas les mêmes gammes spectrales d'accord de phase.

Formes du cristal non linéaire

La figure 2 illustre différentes formes de réalisation d'un Cristal faisant partie du dispositif selon l'invention, les surfaces hachurées représentent les surfaces dudit cristal sur lesquelles peuvent avantageusement être placées des électrodes (pour l'effet électro-optique), les références 1 et 2 désignent chacune un cristal à propriété optique non linéaire présentant un volume cylindrique de révolution de manière complète (référence 1 : cylindre ; référence 2 : cylindroïde), les références 3 et 4 désignent un cristal à propriété optique non linéaire présentant un volume cylindrique de révolution

(référence 3 : cylindre tronqué ; référence 4 : cylindroïde tronqué) de manière partielle (ou tronquée) sur des cadrans opposés et symétriques par rapport à son axe de révolution, des électrodes peuvent être avantageusement placées de part et d'autre d'un cristal de volume 3 ou 4 selon différentes dispositions dont deux sont ici respectivement représentées en figure 2 par une paire de surfaces hachurées orientées horizontalement, et par une paire de surfaces hachurées orientées verticalement.

10

Disposition et géométrie des éléments de focalisation et collection des rayonnements

Le (ou les) rayonnement(s) incident(s) est (sont) focalisé(s) sur le cristal par une (ou des) lentille(s) ou par un miroir à concavité orientée du côté dudit cristal ou par un miroir à concavité orientée du côté opposé dudit cristal. Le (ou les) rayonnement(s) émergent(s) est (sont) collecté(s) par une (ou des) lentille(s) ou par un miroir à concavité orientée du côté dudit cristal ou par un miroir à concavité orientée du côté opposé dudit cristal, indépendant(s) du dispositif de focalisation.

La distance focale du dispositif de focalisation est telle que le (ou les) rayonnement(s) incident(s) a (ont) une dimension faible par rapport au rayon du cristal pour limiter les aberrations optiques et augmenter l'efficacité d'interaction, et que cette dimension soit suffisante pour éviter un endommagement du cristal par une intensité incidente trop importante. La distance focale du dispositif collectant le rayonnement émergent est telle que la divergence de ce rayonnement émergent est minimale. Ces distances focales sont comprises entre 50 et 500mm environ. Les figures 3 et 4 illustrent la réalisation d'un dispositif selon l'invention où un seul rayonnement incident est focalisé sur le cristal. La figure 3 représente un dispositif selon l'invention comprenant un

cristal à propriété optique non linéaire 1 présentant un volume cylindrique de révolution de manière complète et une distance focale f . Ce cristal est capable d'une rotation d'un angle α pouvant aller de 0° à 360° . Il est placé entre
 5 deux lentilles L_1 et L_2 de distances focales respectives f_1 et f_2 .

La figure 4 représente un dispositif selon l'invention comprenant, placé entre deux lentilles L_1 et L_2 , un cristal à propriété optique non linéaire 3 présentant un volume cylindrique de révolution de manière partielle (ou tronquée) sur deux cadrans d'écart angulaire $\Delta\alpha$ opposés et symétriques.

La figure 5 illustre la réalisation d'un dispositif selon l'invention où trois rayonnements incidents sont
 15 focalisés sur le cristal. Le cristal à propriété optique non linéaire 1 présente un volume cylindrique de révolution de manière complète (cylindre 1 ou cylindroïde 2). Il est placé entre six lentilles convergentes ; L_{11} , L_{21} , L_{31} , sont les lentilles servant à focaliser les différents
 20 rayonnements incidents ; L_{1e} , L_{2e} , L_{3e} , sont les lentilles servant à collecter les différents rayonnements émergents.

Calcul général d'une cavité

25 Dans le cas des interactions résonantes, le cristal est placé à l'intérieur d'une cavité. La géométrie de la cavité, rayon de courbure des miroirs R et distances séparant les miroirs du cristal d , est définie en fonction des propriétés spécifiques de réfraction des dioptries
 30 cylindriques de cristaux à propriétés optiques anisotropes, en particulier vis-à-vis de l'angle de double réfraction ρ , l'angle entre le vecteur de Poynting (le faisceau) et le vecteur d'onde (l'onde). Les coefficients de réflexion des miroirs d'entrée et de sortie sont tels que la cavité
 35 puisse être résonante soit à une, soit à deux, soit à trois

ondes, soit à quatre ondes en interaction.

Le miroir recevant le rayonnement incident, appelé miroir d'entrée, peut être plan. Afin d'optimiser le seuil
 5 d'oscillation et la stabilité de la cavité, le miroir d'entrée peut avoir un rayon de courbure adapté (par exemple sphérique, cylindrique ou parabolique), avec la concavité du côté du cristal non linéaire ou du côté opposé du cristal non linéaire.

10

Si les ondes résonantes ont un angle de double réfraction nul, le miroir recevant le rayonnement émergent, appelé miroir de sortie, peut être plan comme le montre la figure 6.

15

La figure 6, représente un dispositif selon l'invention comprenant un cristal à propriété optique non linéaire 1 placé entre deux lentilles L_1 et L_2 , et placé à l'intérieur d'une cavité présentant deux surfaces réfléchissantes (ou
 20 miroirs) entrée et sortie permettant la résonance de l'onde dont le vecteur de Poynting est P_1 . Le schéma de la figure 6 fait apparaître uniquement deux types de faisceaux : le faisceau représenté par le vecteur de Poynting P_1 , résonant, dont l'angle ρ est nul, et le faisceau représenté par le
 25 vecteur de Poynting P_2 , non résonant, avec ρ non nul. Les vecteurs d'onde associés à P_1 et P_2 sont colinéaires à P_1 . Seul un aller-retour de cavité est figuré : sens + pour l'aller, sens - pour le retour. Afin d'optimiser le seuil d'oscillation et la stabilité de la cavité, le miroir de
 30 sortie peut avoir un rayon de courbure adapté (par exemple sphérique, cylindrique ou parabolique), avec la concavité du côté du cristal non linéaire ou avec la concavité orientée du côté opposé du cristal non linéaire.

35

Si au moins une des ondes en résonance a un angle de

double réfraction ρ non nul, le miroir de sortie est sphérique ou cylindrique, de rayon R . Le choix de l'orientation, par rapport au cristal, et de la grandeur du rayon de courbure R ainsi que de la distance d séparant le
 5 cristal du miroir de sortie dépend du paramètre géométrique L de telle sorte que les faisceaux aller et retour de l'onde en résonance soient confondus comme le montrent les figures 7 et 8.

10 Les figures 7 et 8 représentent en effet un dispositif selon l'invention comprenant un cristal à propriété optique non linéaire 1 placé entre deux lentilles L_1 et L_2 et placé à l'intérieur d'une cavité présentant deux surfaces réfléchissantes (ou miroirs) entrée et sortie permettant la
 15 résonance de deux ondes à vecteurs d'ondes colinéaires à P_1 , représentées par leurs vecteurs de Poynting respectifs P_1 et P_2 avec P_1 résonant ou non résonant, et tel que l'angle de double réfraction ρ correspondant est nul, avec P_2 résonant tel que l'angle de double réfraction ρ correspondant est
 20 non nul. Sur la figure 7, le miroir d'entrée est plan, le miroir de sortie présente un rayon de courbure R avec la concavité du côté du cristal 1 ; sur la figure 8, le miroir d'entrée est plan, le miroir de sortie présente un rayon de courbure R avec la concavité du côté opposé au
 25 cristal 1.

Le paramètre L est défini par :

$$L = R_c \left[\cos 2\rho + \frac{\sin 2\rho}{\tan \rho_e} - 1 \right] \quad (12)$$

30 avec $\rho_e = \arcsin (n \sin 2\rho) - 2\rho \quad (13)$

n est l'indice de réfraction de l'onde en résonance dont l'angle ρ est non nul.

Les figures 7 et 8 font apparaître uniquement deux types de faisceaux : le faisceau P_1 , résonant ou non, dont la polarisation est telle que l'angle ρ est nul, et le faisceau P_2 , résonant, avec ρ non nul. Les vecteurs d'onde associés à P_1 et P_2 sont colinéaires à P_1 . Seul un aller-retour de cavité est figuré : sens + pour l'aller, sens - pour le retour.

La figure 7 concerne un miroir de sortie dont la concavité est orientée du côté du cristal. Pour une valeur de d donnée, le rayon de courbure R est défini par :

$$R = d - L \quad \text{avec } d > L \quad (14)$$

L est donné par les relations (12) et (13).

La figure 8 concerne un miroir de sortie dont la concavité est orientée du côté opposé au cristal.

Pour une valeur de d donnée, le rayon de courbure R est défini par :

$$R = L - d \quad \text{avec } d < L \quad (15)$$

L est donné par les relations (12) et (13).

Le rapport L/R_c est constant à 10^{-3} près pour des valeurs de ρ comprises entre 0° et 2° , qui sont des valeurs typiques des principaux cristaux utilisables pour les interactions paramétriques. La variation de L/R_c est de l'ordre de 10^{-2} lorsque ρ varie de 2° à 3° . Ainsi pour ces cas de fort angle de double réfraction, les trajets des faisceaux aller et retour sont confondus si le miroir de sortie présente une courbure adaptée, non sphérique et non cylindrique, qui tient compte des valeurs de L et ρ correspondant à la plage spectrale utilisée ; un tel miroir peut être employé afin d'optimiser la stabilité et le seuil d'oscillation de la cavité.

Pour un miroir de rayon de courbure R donné, la configuration selon la figure 8 n'est envisageable que si le rayon du cylindre est supérieur à une valeur minimale.

5

$$R_c > \frac{R}{\cos 2\rho + \frac{\sin 2\rho}{\tan \rho_e} - 1} \quad (16)$$

10 tel que $d (=L-R)$ soit positif.

Lorsque les deux configurations des figures 7 et 8 sont envisageables, le cas de la figure 8 conduit à une longueur totale de la cavité ($2R_c+L$ pour deux miroirs entrée et sortie de même rayon de courbure) plus courte que la
15 configuration de la figure 7 ($2R_c+L+2R$). Pour des rayonnements à impulsions temporelles courtes, une cavité de faible longueur permet une conversion plus efficace.

Exemple 2. Oscillateur Paramétrique Optique (OPO) en
20 accord de phase par biréfringence

Dans le cas d'une interaction à 3 ondes de pulsations respectives ω_1 , ω_2 et ω_3 avec $\omega_3=\omega_1+\omega_2$, le rayonnement laser incident, appelé "pompe" a une longueur d'onde $\lambda_p=2\pi c/\omega_3$, où
25 c est la vitesse de la lumière dans le vide ω_3 la plus grande des trois pulsations des ondes en interaction. Les deux pulsations des ondes émises dans l'OPO sont appelées "signal" et "complémentaire", de longueurs d'onde respectives $\lambda_s=2\pi c/\omega_2$ et $\lambda_i=2\pi c/\omega_1$, telles que $\omega_1+\omega_2=\omega_3$ et ω_1
30 $< \omega_2$. Le tableau 1 ci-dessous donne, pour $\lambda_p=0,532\mu\text{m}$ et $\lambda_p=1,064\mu\text{m}$, la plage de longueurs d'onde du signal $\Delta\lambda_s$ et du complémentaire $\Delta\lambda_i$, qu'il est possible de générer en accord de phase par biréfringence pour une rotation totale $\Delta\alpha$ à partir de l'angle minimum d'accord de phase α_{\min} , des

cylindres de plusieurs cristaux à propriétés optiques non linéaires : KTiOPO_4 (KTP), CsTiOAsO_4 (CTA), RbTiOPO_4 (RTP), RbTiOAsO_4 (RTA), KTiOAsO_4 (KTA), LiNbO_3 . L'axe de révolution, X, Y ou Z, est un axe du repère optique, défini dans l'exemple 1. Pour une rotation autour de l'axe Z, α est l'angle ϕ des coordonnées sphériques ; pour une rotation autour des axes Y ou X, α correspond à l'angle θ des coordonnées sphériques. $\Delta\alpha$ et α_{\min} sont calculés à partir des relations d'accord de phase et des équations de Sellmeier de l'exemple 1.

Chaque cristal, usiné en cylindre complet 1 ou en cylindre partiel 3 (cf figure 2) est placé à l'intérieur d'une cavité résonante telle que ci-dessus définie en exemple 1.

Cristal	λ_p (μm)	$\Delta\lambda_s$ (μm)	$\Delta\lambda_i$ (μm)	Axe de rotation du cylindre	Angle de rotation $\Delta\alpha$ ($^\circ$)	α_{\min} ($^\circ$)
KTiOPO_4	0,532 (-)	0,62 - 1,04 (+)	1,09 - 3,5 (-)	Y	46	44
KTiOPO_4	1,064 (-)	1,53 - 2,12 (+)	2,13 - 3,5 (-)	Y	7	45,5
CsTiOAsO_4	0,532 (-)	0,59 - 0,74 (+)	1,9 - 5,2 (-)	Y	39	51
CsTiOAsO_4	1,064 (-)	1,33 - 2,12 (+)	2,13 - 5,2 (-)	Y	15	61,5
RbTiOAsO_4	0,532 (-)	0,59 - 0,855 (+)	1,41 - 5,2 (-)	Y	49	41
RbTiOAsO_4	1,064 (-)	1,33 - 2,12 (+)	2,13 - 5,2 (-)	Y	9,3	44,6
RbTiOPO_4	0,532 (-)	0,62 - 0,95 (+)	1,21 - 3,5 (-)	Y	45	45
RbTiOPO_4	1,064 (-)	1,52 - 2,12 (+)	2,13 - 3,5 (-)	Y	8,3	49,5
LiNbO_3	0,532 (-)	0,59 - 0,70 (+)	2,2 - 5,2 (-)	Y (ou X)	40	50
LiNbO_3	1,064 (-)	1,33 - 2,12 (+)	2,13 - 5,2 (-)	Y (ou X)	21	57
KTiOPO_4	0,532 (-)	0,95 - 1,06 (-)	1,06 - 1,2 (+)	Z	67	23
KTiOPO_4	1,064 (-)	1,52 - 1,58 (-)	3,26 - 3,5 (+)	Z	90	0
CsTiOAsO_4	0,532 (-)	0,74 - 0,84 (+)	1,45 - 1,9 (-)	Z	90	0
CsTiOAsO_4	1,064 (-)	1,7 - 2,0 (-)	2,27 - 2,8 (+)	Z	90	0
RbTiOAsO_4	0,532 (-)	0,855 - 0,955 (+)	1,2 - 1,41 (-)	Z	90	0
RbTiOAsO_4	1,064 (-)	1,54 - 1,61 (-)	3,15 - 3,4 (+)	Z	90	0
RbTiOPO_4	0,532 (-)	0,95 - 1,06 (+)	1,06 - 1,21 (-)	Z	60	0
RbTiOPO_4	1,064 (-)	1,61 - 1,69 (-)	2,85 - 3,15 (+)	Z	90	0
KTiOAsO_4	0,532 (-)	0,96 - 1,04 (+)	1,08 - 1,19 (-)	Z	90	0
KTiOAsO_4	1,064 (-)	1,55 - 1,60 (-)	3,15 - 3,38 (+)	Z	90	0

Tableau 1

(+) et (-) font référence aux indices de réfraction n^+ et n^- définis dans l'exemple 1, qui interviennent dans la relation d'accord de phase.

Le cas d'un OPO accordable dans la gamme $1,4\mu\text{m} - 5,2\mu\text{m}$ pour des applications en spectroscopie infrarouge est détaillé ci-après. Le laser de pompe émet un rayonnement à $0,532\mu\text{m}$ (laser YAG-Nd doublé en fréquence). Un cristal de RbTiOAsO_4 est usiné en cylindre partiel 3 (cf figure 2) avec les faces cylindriques polies optiquement. L'axe de révolution est porté par l'axe Y (identique à l'axe cristallographique b). Les directions extrêmes de la portion cylindrique sont l'axe X (identique à l'axe cristallographique a) d'une part et la direction ($\phi=0^\circ$, $\theta=41^\circ$) d'autre part. La rotation du cristal s'effectue autour de l'axe Y, entre ces deux directions extrêmes, au moyen d'un dispositif de rotation micrométrique motorisé solidaire du cristal.

Le rayon de la portion cylindrique est $R_c=10\text{mm}$. Le cristal est placé entre deux miroirs cylindriques de rayon de courbure $R=10\text{mm}$. Un miroir est totalement réfléchissant pour les longueurs d'ondes de $0,59\mu\text{m}$ à $0,86\mu\text{m}$, le second miroir a un coefficient de réflexion important ($R=90\%$) pour ces mêmes longueurs d'ondes. Les miroirs sont disposés suivant l'arrangement décrit figure 8. La longueur totale de la cavité est de $32,5\text{mm}$ avec $L=12,5\text{mm}$ et $d=2,5\text{mm}$. Si les miroirs sont disposés suivant l'arrangement décrit en figure 7, la longueur totale de la cavité est de $52,5\text{mm}$ avec $L=12,5\text{mm}$ et $d=22,5\text{mm}$.

25

Exemple 3. Générateur de Second Harmonique (GSH) en accord de phase par biréfringence

Dans le cas d'une interaction à 3 ondes de pulsations respectives ω_1 , ω_2 et ω_3 avec $\omega_3=\omega_1+\omega_2$, le rayonnement incident, appelé "pompe", a une longueur d'onde $\lambda_F=2\pi c/\omega$, avec $\omega = \omega_1 = \omega_2$. La pulsation des ondes émises dans le GSH est le second harmonique de l'onde pompe, soit de longueur d'onde $\lambda_H = 2\pi c/2\omega$, avec $2\omega = \omega_3$. Le tableau 2 donne, pour une rotation totale $\Delta\alpha = 90^\circ$, la plage de longueurs d'onde

35

de pompe $\Delta\lambda_f$ pour lesquelles un accord de phase par biréfringence de la GSH est possible dans des cylindres de plusieurs cristaux à propriétés optiques non linéaires : KTiOPO_4 (KTP), RbTiOAsO_4 (RTA), CsTiOAsO_4 (CTA), RbTiOPO_4 (RTP), et KTiOAsO_4 (KTA). La rotation s'effectue autour de l'axe Z de ces cristaux (axe cristallographique c qui est l'axe binaire), à partir d'un des axes X ou Y. Les calculs sont effectués à partir des relations d'accord de phase 1b (équivalente à 1c dans le cas de la GSH) de l'exemple 1.

Chaque cristal, usiné en cylindre complet 1 ou en cylindre partiel (ou tronqué) 3 (cf figure 2) est placé à l'extérieur ou à l'intérieur d'une cavité telle que définie en exemple 1 ci-dessus.

Cristal	$\Delta\lambda_f (\mu\text{m})$
KTiOPO_4	0,99 - 1,08
RbTiOAsO_4	1,14 - 1,25
CsTiOAsO_4	1,27 - 1,55
RbTiOPO_4	1,04 - 1,15
KTiOAsO_4	1,08 - 1,15

Tableau 2

Le cas d'un cylindre de CsTiOAsO_4 est détaillé ci-après. L'obtention de rayonnement affiné spectralement entre 0,5 μm et 0,7 μm est très difficile avec les OPO classiques. Pour des applications en spectroscopie dans ce domaine de longueurs d'onde, le doublage de fréquence du rayonnement émis entre 1 μm et 1,4 μm par un OPO est envisagé. Un cristal de CsTiOAsO_4 usiné en cylindre partiel 3 (cf figure 2) avec l'axe binaire Z (axe cristallographique c) comme axe de révolution est fixé sur un support de rotation micrométrique motorisé. La face cylindrique du cristal est polie optiquement. Le rayonnement incident, émis entre 1,27 μm et 1,55 μm par un OPO, est focalisé par une lentille convergente de focale 100mm dans le cristal de rayon $R_c=5\text{mm}$.

Le rayonnement émergent est collecté avec une seconde lentille de focale identique. Une rotation complète de 90°

entre les axes X et Y permet de générer un rayonnement harmonique entre $0,63\mu\text{m}$ et $0,77\mu\text{m}$ de façon efficace du fait des angles de double réfraction toujours faibles pour les directions d'accord de phase considérées.

5

Exemple 4. Calcul de la longueur de cohérence

L'intérêt du quasi-accord de phase est notamment qu'il peut être réalisé pour des combinaisons de toute solution n^+ ou n^- aux pulsations des ondes en interaction. n^+ sont donnés par la relation (5) de l'exemple 1.

La longueur de cohérence L_c des interactions paramétriques dans les cristaux à structure alternée périodiquement des exemples 5 et 6 est donnée par la relation suivante :

$$L_c = \frac{\pi c}{\omega_3 n_z(\omega_3) - [\omega_1 n_z(\omega_1) + \omega_2 n_z(\omega_2)]} \quad (17)$$

n_z est calculé à partir des équations de Sellmeier données dans l'exemple 1. La figure 9 représente un dispositif selon l'invention comprenant, placé entre deux lentilles L_1 et L_2 , un cristal à propriété optique non linéaire 1 présentant un volume cylindrique de révolution de manière complète, capable de rotation selon un angle α pouvant aller de 0 à 360° et présentant un coefficient non linéaire effectif de signe alterné $(+,-)$ selon le vecteur de périodicité V_Δ . Le rayonnement laser étant considéré fixe, la périodicité Δ du réseau selon la direction de propagation est fonction de l'angle de rotation α . Si α est repéré par rapport au vecteur de périodicité V_Δ , la périodicité pour un angle α quelconque est $\Delta(\alpha) = 2L_c/\cos\alpha$. Ainsi à chaque angle α correspond une interaction paramétrique particulière $(\omega_1, \omega_2, \omega_3)$ telle que $\Delta(\alpha)$ soit égal à un multiple impair de la longueur de cohérence de

cette interaction. Ceci permet de réaliser l'accordabilité du dispositif paramétrique. La symétrie de la structure périodique est telle qu'une rotation totale $\Delta\alpha=90^\circ$ permet d'accéder à toutes les périodicités : $\Delta(\alpha=0^\circ) = 2L_c$ à
 5 $\Delta(\alpha=90^\circ) \rightarrow \infty$. Ainsi un volume cylindrique de révolution de manière partielle (ou tronquée) 3 (cf figure 2) est également utilisable dans ce cas.

Exemple 5. Oscillateur Paramétrique Optique (OPO) en
 10 quasi-accord de phase

Dans le cas d'une interaction à 3 ondes de pulsations respectives ω_1 , ω_2 et ω_3 avec $\omega_3 = \omega_1 + \omega_2$, le rayonnement laser incident, appelé "pompe", a une longueur d'onde
 15 $\lambda_p = 2\pi c/\omega_3$, où c est la vitesse de la lumière dans le vide et ω_3 la plus grande des trois pulsations des ondes en interaction. Les deux pulsations des ondes émises dans l'OPO sont appelées "signal" et "complémentaire", de longueurs d'onde respectives $\lambda_s = 2\pi c/\omega_2$ et $\lambda_1 = 2\pi c/\omega_1$,
 20 telles que $\omega_1 + \omega_2 = \omega_3$ avec $\omega_1 < \omega_2$. Le tableau 3 ci-dessous donne, pour $\lambda_p = 0,532\mu\text{m}$ et $\lambda_p = 1,064\mu\text{m}$, la plage de longueurs d'onde du signal et du complémentaire, respectivement $\Delta\lambda_s$ et $\Delta\lambda_1$, qu'il est possible de générer en
 25 quasi-accord de phase pour une rotation totale $\Delta\alpha$ du cylindre de plusieurs cristaux à propriétés optiques non linéaires, KTiOPO_4 , CsTiOAsO_4 , RbTiOAsO_4 , LiNbO_3 , LiTaO_3 , RbTiOPO_4 et KTiOAsO_4 dont le signe du coefficient effectif est périodiquement alterné sur une longueur de cohérence L_c (cf figure 9). Les domaines sont inversés selon l'axe
 30 polaire des cristaux qui correspond à l'axe de révolution du cylindre conformément à ce qui est décrit dans l'exemple 4 ci-dessus. L'angle de rotation est repéré par rapport au vecteur de périodicité du réseau V_Λ . L'interaction considérée concerne 3 ondes polarisées selon l'axe polaire.

Les calculs sont effectués à partir de la relation (17) de l'exemple 4 et des équations de Sellmeier de l'exemple 1.

Chaque cristal, usiné en cylindre complet 1 ou en cylindre partiel (ou tronqué) 3 (cf figure 2) est placé dans une cavité résonante telle que ci-avant définie en exemple 1. Les trois ondes en interaction ayant un angle de réfraction nul, les miroirs d'entrée et de sortie de la cavité peuvent être plans.

10

15

20

Matériau	λ_p (μm)	$\Delta\lambda_s$ (μm)	$\Delta\lambda_i$ (μm)	Pas du réseau $V_\Delta = 2L_c$ (μm)	Angle de rotation maximum $\Delta\alpha$ ($^\circ$)
KTiOPO ₄	0,532	0,62 - 1,06	1,06 - 3,5	9,3	50
KTiOPO ₄	1,064	1,52 - 2,12	2,13 - 3,5	36,5	23
RbTiOAsO ₄	0,532	0,59 - 1,06	1,06 - 5,2	15,6	57
RbTiOAsO ₄	1,064	1,33 - 2,12	2,13 - 5,2	34,8	34
RbTiOPO ₄	0,532	0,62 - 1,06	1,06 - 3,5	8,8	49
RbTiOPO ₄	1,064	1,52 - 2,12	2,13 - 3,5	32	25
LiNbO ₃	0,532	0,59 - 1,06	1,06 - 5,2	6,8	56
LiNbO ₃	1,064	1,33 - 2,12	2,13 - 5,2	25,7	36
CsTiOAsO ₄	0,532	0,59 - 1,06	1,06 - 5,2	7,9	56
CsTiOAsO ₄	1,064	1,33 - 2,12	2,13 - 5,2	30	38
KTiOAsO ₄	0,532	0,59 - 1,06	1,06 - 5,2	8,5	55
KTiOAsO ₄	1,064	1,33 - 2,12	2,13 - 5,2	29,5	39

Tableau 3

Le cas d'un OPO accordable entre 3 μm et 5 μm pour des applications en contre mesures optroniques est détaillé ci-après. Une structure de LiNbO₃ à domaines ferroélectriques alternés de périodicité 26,26 μm est usinée en cylindre partiel 3 (cf figure), avec les faces cylindriques polies optiquement. L'axe de rotation du cylindre est l'axe binaire Z auquel les domaines ferroélectriques sont parallèles. Le vecteur de périodicité de la structure V_Δ est perpendiculaire à cet axe et constitue une des directions extrêmes de la portion cylindrique. L'autre direction extrême de la portion cylindrique est située à 40,5° de la première. La structure est fixée sur un support de rotation micrométrique motorisé. La portion de cylindre a un rayon

$R_c=13\text{mm}$ et une épaisseur de 1mm . Elle est placée au centre d'une cavité formée de deux miroirs cylindriques de rayon de courbure $R=15\text{mm}$ dont la concavité est orientée du côté du cristal. Le premier miroir est totalement réfléchissant pour les longueurs d'ondes comprises entre $1,35\mu\text{m}$ et $1,65\mu\text{m}$, le second miroir a un coefficient de réflexion $R=90\%$ pour ces mêmes rayonnements. La longueur totale de la cavité est de 30mm . Le rayonnement laser de pompe est émis à $1,064\mu\text{m}$ par un laser YAG:Nd. Deux lentilles de focale $f=100\text{mm}$ sont placées de part et d'autre de la cavité pour focaliser le rayonnement incident et collecter le rayonnement émergent.

Exemple 6. Générateur de Second Harmonique (GSH) en quasi-
accord de phase

Dans le cas d'une interaction à 3 ondes de pulsations respectives ω_1 , ω_2 et ω_3 avec $\omega_3 = \omega_1 + \omega_2$, le rayonnement incident, appelé "pompe", a une longueur d'onde $\lambda_F = 2\pi c/\omega$, avec $\omega = \omega_1 = \omega_2$. La pulsation des ondes émises dans le GSH est le second harmonique de l'onde pompe, soit de longueur d'onde $\lambda_H = 2\pi c/2\omega$, avec $2\omega = \omega_3 = \omega + \omega$. Le tableau 4 ci-dessous donne la plage de longueurs d'onde de pompe $\Delta\lambda_F$, correspondant à une rotation totale $\Delta\alpha$, pour lesquelles le quasi-accord de phase de la GSH est possible dans des cylindres de plusieurs cristaux à propriétés optiques non linéaires KTiOPO_4 , RbTiOAsO_4 , CsTiOAsO_4 , RbTiOPO_4 , KTiOAsO_4 , LiNbO_3 et LiTaO_3 , dont le signe du coefficient effectif est périodiquement alterné sur une longueur de cohérence L_c (cf figure 9). Les domaines sont inversés selon l'axe polaire des cristaux qui correspond à l'axe de révolution du cylindre conformément à ce qui est décrit en exemple 4 ci-avant. L'angle de rotation est repéré par rapport au vecteur de périodicité du réseau V_Δ . L'interaction

considérée concerne 3 ondes polarisées selon l'axe polaire. Les calculs sont effectués à partir de la relation (17) de l'exemple 4 et les équations de Sellmeier de l'exemple 1.

5 Chaque cristal, usiné en cylindre complet 1 ou en cylindre partiel (ou tronqué) 3 (cf figure 2), est placé soit à l'extérieur, soit à l'intérieur d'une cavité telle que ci-avant définie en exemple 1. La figure 6 illustre un tel dispositif lorsque le cristal est placé à l'intérieur d'une
10 telle cavité.

Matériau	$\Delta\lambda_f$ (μm)	Périodicité de la structure $V_A=2L_c$ (μm)	Angle de rotation maximum $\Delta\alpha$ ($^\circ$)
KTiOPO ₄	0,8 - 0,95	3,5	56
RbTiOPO ₄	0,8 - 0,95	3,15	58
RbTiOAsO ₄	0,8 - 0,95	3,0	58
LiNbO ₃	0,75 - 0,95	2,0	64
LiTaO ₃	0,64 - 0,95	1,3	76
CsTiOAsO ₄	0,8 - 0,95	2,7	60
KTiOAsO ₄	0,8 - 0,95	3,0	59

Tableau 4

20 Par exemple, un cylindre de LiTaO₃ à domaines alternés périodiquement peut être utilisé pour générer un rayonnement laser accordable de courte longueur d'onde. La structure a une périodicité de 1,31 μm , un rayon $R_c=8\text{mm}$ et une épaisseur de 0,5mm. La rotation de la structure
25 s'effectue autour de l'axe binaire Z, sur un support de rotation micrométrique. Elle permet le doublage de fréquence du rayonnement laser incident émis par un laser titane-saphir ou par un OPO accordable.

Il demeure bien entendu que la présente invention
30 n'est pas limitée aux exemples de réalisation décrits et représentés ci-dessus, mais qu'elle en englobe toutes les variantes. C'est ainsi que notamment le cristal peut présenter un volume de cylindre 1, un volume de cylindroïde 2, un volume de cylindre partiel 3 ou un volume de
35 cylindroïde partiel 4, tel que représenté sur la figure 2.

REVENDICATIONS

1. Dispositif pour la génération, par interaction(s) à trois ou quatre ondes à partir d'un ou plusieurs rayonnement(s) optique(s) incident(s), d'un ou plusieurs rayonnement(s) optique(s) émergent(s) accordable(s) au moins en fréquence, caractérisé en ce qu'il est essentiellement constitué par un cristal à propriété optique non linéaire dont la surface définit un volume cylindrique de révolution de manière complète, ou bien de manière partielle sur des cadrans opposés et symétriques par rapport à son axe de révolution.

2. Dispositif selon la revendication 1, caractérisé en ce que ledit cristal présente un volume choisi parmi le groupe constitué par un volume de cylindre (1), un volume de cylindroïde (2), un volume de cylindre partiel (3), un volume de cylindroïde partiel (4).

3. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que ledit cristal comporte au moins une entité chimique hyperpolarisable.

4. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que ledit cristal est un cristal choisi parmi le groupe constitué par un cristal de LiTaO_3 , de KTiOPO_4 , de KTiOAsO_4 , de RbTiOPO_4 , de RbTiOAsO_4 , de CsTiOAsO_4 , de $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$, de LiB_3O_5 , de KNbO_3 , de LiIO_3 , de LiNbO_3 , de KD_2PO_4 , de KH_2PO_4 , de $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, de CsD_2AsO_4 , de CsH_2AsO_4 , de AgGaS_2 , de AgGaSe_2 , de ZnGeP_2 , de Tl_3AsSe_3 et un cristal de GaAs .

5. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que la taille dudit cristal est choisie parmi le groupe constitué par une taille micrométrique, millimétrique et une taille centrimétrique.

6. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'il

comprend en outre un système optique permettant d'une part de confiner et de focaliser ledit (lesdits) rayonnement(s) optique(s) incident(s) sur la (les) partie(s) centrale(s) dudit cristal, et permettant d'autre part de collimater et
5 de diriger ledit (lesdits) rayonnement(s) optique(s) émergent(s).

7. Dispositif selon la revendication 6, caractérisé en ce que ledit système optique est essentiellement constitué par deux éléments placés de part et d'autre dudit cristal
10 et choisis parmi le groupe constitué par une lentille convergente, une lentille divergente, un ensemble de lentilles, une surface réfléchissante ou un miroir avec la concavité orientée du côté dudit cristal, et une surface réfléchissante ou un miroir avec la concavité orientée du
15 côté opposé dudit cristal.

8. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que l'axe de révolution dudit cristal est confondu avec un axe mécanique rotatif de façon à ce que le cristal puisse tourner autour
20 de son axe.

9. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 8, caractérisé en ce que ledit cristal est un cristal à propriété d'accord de phase par biréfringence.

10. Dispositif selon la revendication 9, caractérisé en ce que ledit cristal est un cristal monocristallin.

11. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 8, caractérisé en ce que ledit cristal est un cristal à propriété de quasi-accord de phase.

12. Dispositif selon la revendication 11, caractérisé en ce que ledit cristal présente, le long de la direction de propagation d'une interaction recherchée, une juxtaposition périodiquement alternée de couches monocristallines.

13. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que l'axe de

révolution dudit cristal est orthogonal au plan de la (ou des) direction(s) de vecteurs d'onde d'une interaction recherchée, et plus particulièrement de la (ou des) direction(s) permettant une efficacité maximale de cette
5 interaction.

14. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que ledit cristal contient la (ou les) direction(s) de vecteurs d'onde d'une interaction recherchée, et en particulier la
10 (ou les) direction(s) permettant une efficacité maximale de cette interaction, de telle manière qu'elle(s) soit (soient) accessible(s) audit (auxdits) rayonnement(s) optique(s) incident(s) en incidence normale sur une (des) surface(s) dudit cristal définissant un volume cylindrique
15 de révolution, soit par rotation dudit cristal autour de son axe de révolution, soit par rotation dudit (desdits) rayonnement(s) optique(s) incident(s) autour dudit cristal dans un plan orthogonal à l'axe de révolution dudit cristal.

20 15. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que ledit (lesdits) rayonnement(s) optique(s) incident(s) comprend (comprennent chacun) une, deux, trois ou quatre fréquence(s) égales ou différentes, à vecteurs d'onde
25 colinéaires ou non colinéaires, et en incidence normale sur une (des) surface(s) dudit cristal définissant un volume cylindrique de révolution.

16. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que ledit
30 (lesdits) rayonnement(s) optique(s) incident(s) est un (sont des) rayonnement(s) laser, notamment un (des) rayonnement(s) laser choisi(s) parmi le groupe constitué par un rayonnement laser à fréquence(s) fixe(s) et un rayonnement laser à fréquence(s) accordable(s).

35 17. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que ladite

(ou lesdites) interaction(s) est (sont des) une interaction(s) choisie(s) parmi le groupe constitué par une interaction à trois ondes ou une interaction à quatre ondes.

5 18. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que ledit cristal présente une structure non centro-symétrique, de telle sorte que ledit dispositif permette une interaction à trois ondes.

10 19. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que ledit (ou au moins un desdits) rayonnement(s) optique(s) incident(s) comprend deux fréquences pour une interaction à trois ondes, ou trois fréquences pour une interaction à quatre
15 ondes, et en ce que ledit (ou au moins un desdits) rayonnement(s) optique(s) émergent(s) comprend une fréquence qui correspond à la somme desdites deux, ou le cas échéant trois fréquences comprises dans ledit (lesdits) rayonnement(s) optique(s) incident(s).

20 20. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que ledit (ou au moins un desdits) rayonnement(s) optique(s) émergent(s) comprend une fréquence qui est égale au double ou au triple
25 desdits) rayonnement(s) optique(s) incident(s).

 21. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que ledit (ou au moins un desdits) rayonnement(s) optique(s) incident(s) comprend deux fréquences pour une interaction à trois
30 ondes, ou trois fréquences pour une interaction à quatre ondes, et en ce que ledit (ou au moins un desdits) rayonnement(s) optique(s) émergent(s) comprend une fréquence qui correspond à une différence entre lesdites deux, ou le cas échéant trois fréquences comprises dans
35 ledit (lesdits) rayonnement(s) optique(s) incident(s).

 22. Dispositif selon l'une quelconque des

revendications précédentes, caractérisé en ce que ledit (ou au moins un desdits) rayonnement(s) optique(s) émergent(s) comprend deux fréquences pour une interaction à trois ondes, ou trois fréquences pour une interaction à quatre ondes, dont la somme est égale à une fréquence comprise dans ledit (ou au moins un desdits) rayonnement(s) optique(s) incident(s).

23. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 22, caractérisé en ce que ladite (ou au moins une desdites) interaction(s) est une interaction à vecteurs d'ondes colinéaires.

24. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 22, caractérisé en ce que ladite interaction est une interaction à vecteurs d'ondes non colinéaires.

25. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que ladite (ou au moins une desdites) interaction(s) est une interaction choisie parmi le groupe constitué par une amplification paramétrique optique, une génération de second ou tierce harmonique.

26. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que ledit cristal est placé à l'intérieur d'une cavité permettant une interaction résonante.

27. Dispositif selon la revendication 26, caractérisé en ce que ladite interaction résonante est une interaction à trois ou quatre ondes choisie parmi le groupe constitué par une oscillation paramétrique optique, une amplification paramétrique optique, une génération de second ou tierce harmonique.

28. Dispositif selon la revendication 26 ou 27, caractérisé en ce que ladite cavité comporte des surfaces réfléchissantes entrée et sortie en regard l'une de l'autre permettant la résonance d'au moins une des ondes en interaction.

29. Dispositif selon la revendication 28, caractérisé en ce que ladite surface réfléchissante entrée est choisie parmi le groupe constitué par une surface réfléchissante plane et une surface réfléchissante présentant un rayon de courbure, avec la concavité choisie par le groupe constitué par une concavité orientée du côté dudit cristal et une concavité orientée du côté opposé, de manière à optimiser le seuil d'oscillation et la stabilité de la cavité.

30. Dispositif selon la revendication 28 ou 29, caractérisé en ce que ladite au moins une onde en résonance a un angle de double réfraction ρ non nul, et en ce que ladite surface réfléchissante sortie présente un rayon de courbure, avec une concavité choisie parmi le groupe constitué par une concavité orientée du côté dudit cristal et une concavité orientée du côté opposé dudit cristal, de façon à ce que les faisceaux aller et retour soient confondus.

31. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 28 à 30, caractérisé en ce que ladite au moins une onde en résonance a un angle de double réfraction ρ non nul, et en ce que ladite surface réfléchissante sortie est placée à une distance (d) dudit cristal et présente un rayon de courbure R dont les valeurs respectives répondent à l'équation $R = d - L$ avec d supérieur à L pour une concavité orientée du côté dudit cristal, ou à l'équation $R = L - d$ avec d inférieur à L pour une concavité orientée du côté opposé dudit cristal, avec L défini par $L = R_c (\cos(2\rho) + (\sin(2\rho) / \tan(\rho_e)) - 1)$, avec R_c étant le rayon du volume cylindrique de révolution, ρ l'angle de double réfraction, et avec ρ_e défini par $\rho_e = \arcsin(n \sin(2\rho) - 2\rho)$, avec n étant l'indice de réfraction de ladite au moins une onde dont la résonance est recherchée.

32. Dispositif selon la revendication 28 ou 29, caractérisé en ce que ladite au moins une onde en résonance présente un angle de double réfraction ρ nul, et en ce que

ladite surface réfléchissante sortie est choisie parmi une surface réfléchissante plane et une surface réfléchissante présentant un rayon de courbure, avec la concavité choisie
5 côté dudit cristal et une concavité orientée du côté opposé, de manière à optimiser le seuil d'oscillation et la stabilité de la cavité.

33. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'il
10 comprend en outre des moyens pour le contrôle thermostatique dudit cristal

34. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que ledit
15 cristal est maintenu à une température différente de la température ambiante.

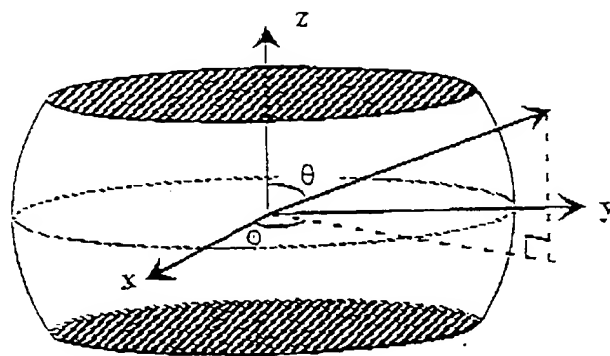
35. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'il
comprend en outre des moyens permettant d'appliquer un
20 champ électrique statique ou de basse fréquence à l'intérieur dudit cristal.

36. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'il
comprend en outre une paire d'électrodes placées sur des
faces opposées dudit cristal.

25 37. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'il constitue un élément choisi parmi le groupe constitué par un élément de spectroscope, un élément de système de télédétection, un élément de système de télétransmission,
30 un élément de système de téléguidage, un élément de système LIDAR, un élément de système de contre-mesures optroniques.

38. Méthode pour la génération d'un rayonnement optique accordable au moins en fréquence, caractérisé en ce
qu'elle met en œuvre un dispositif selon l'une quelconque
35 des revendications précédentes.

Figure 1



cylindroïde .

Figure 2

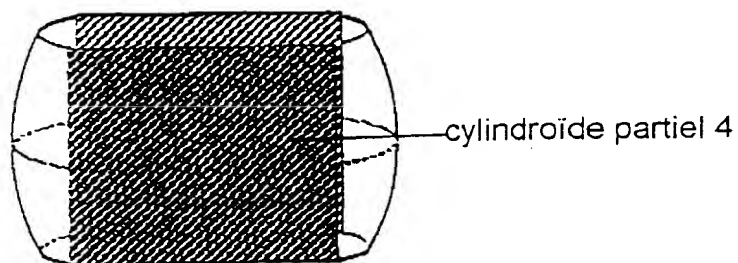
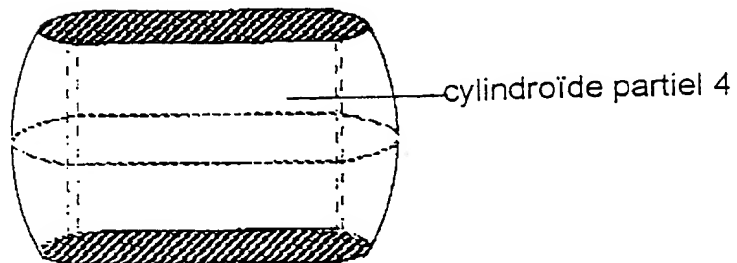
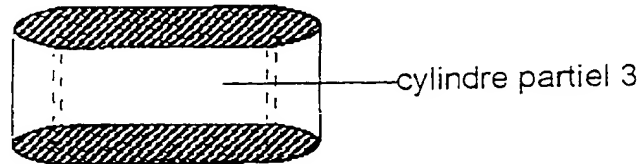
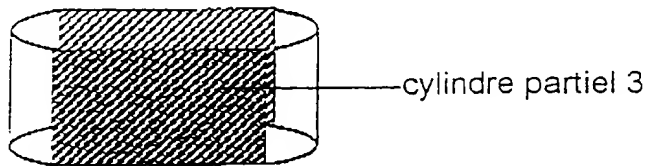
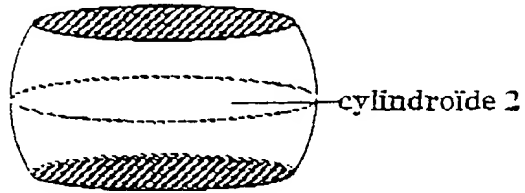
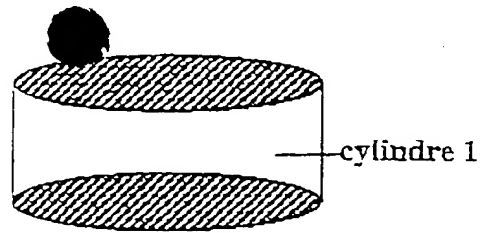


Figure 3

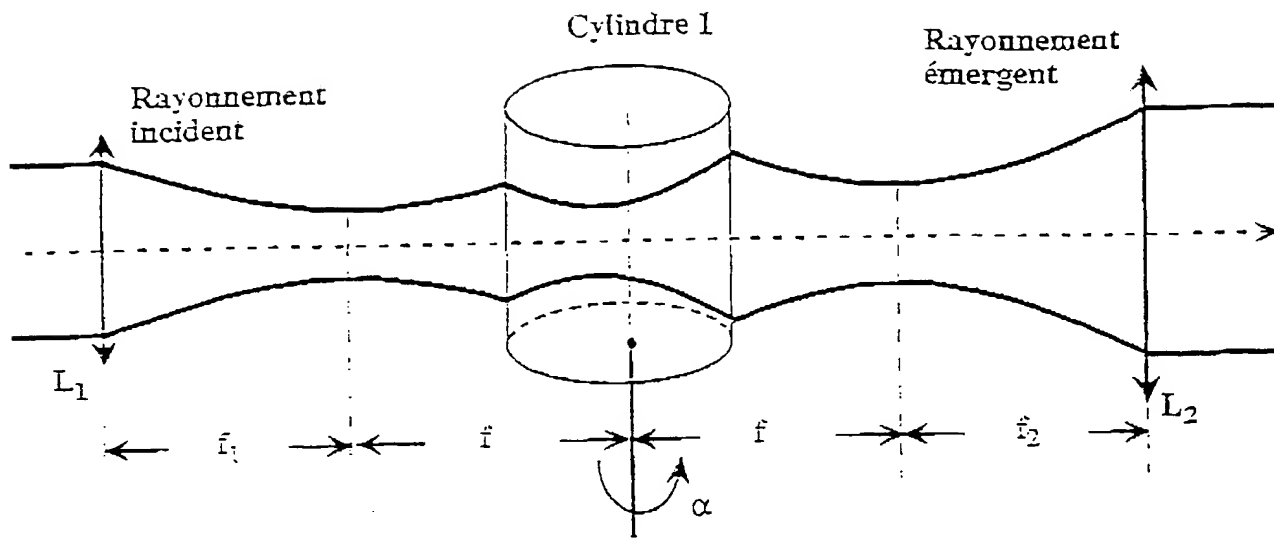


Figure 4

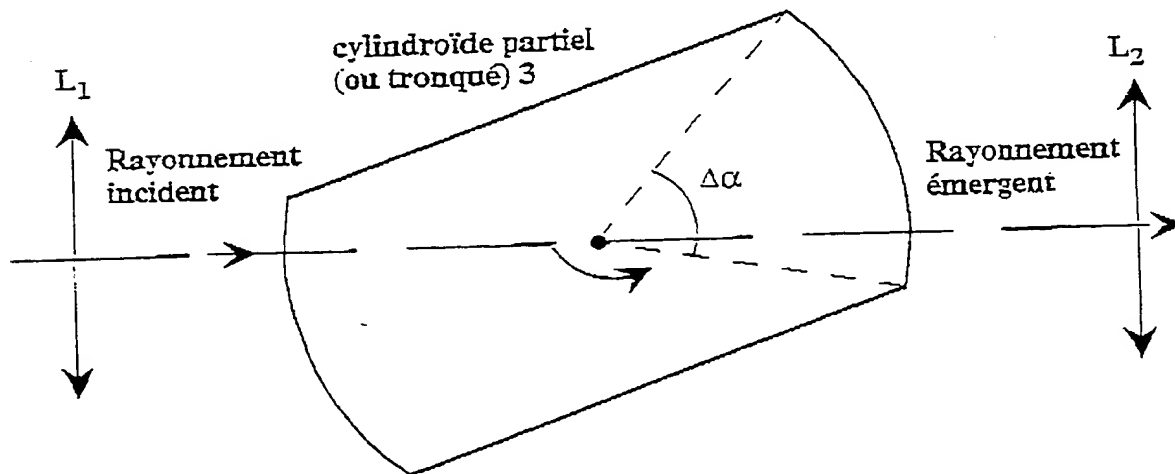


Figure 5

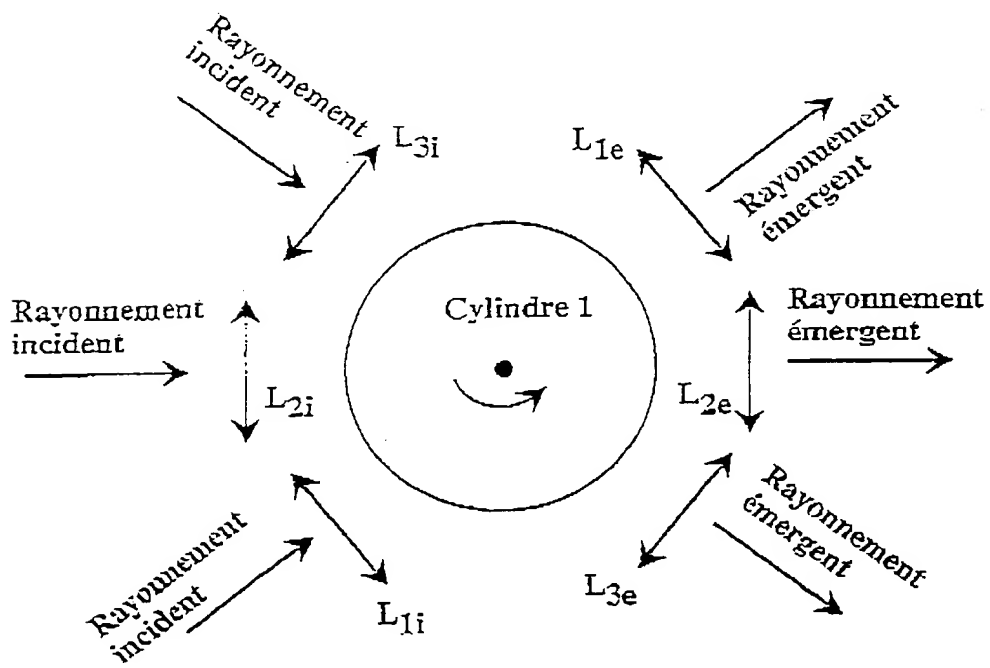


Figure 6

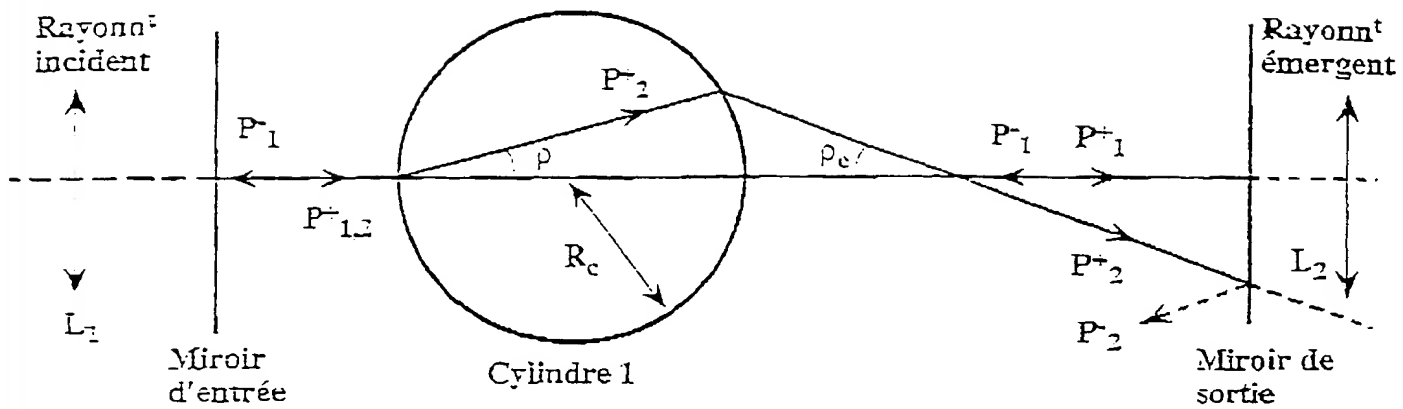


Figure 7

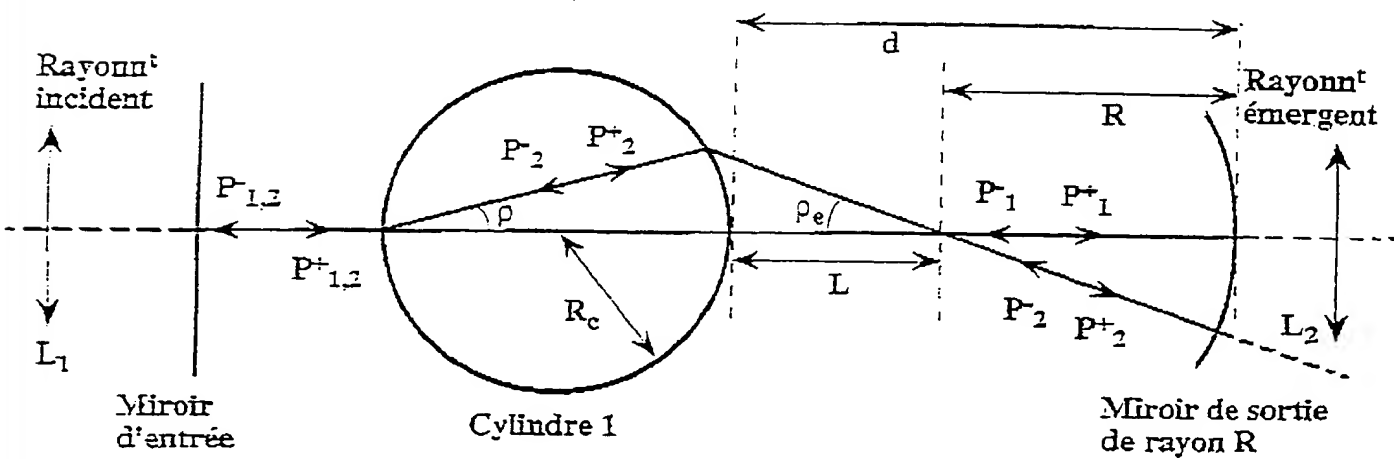
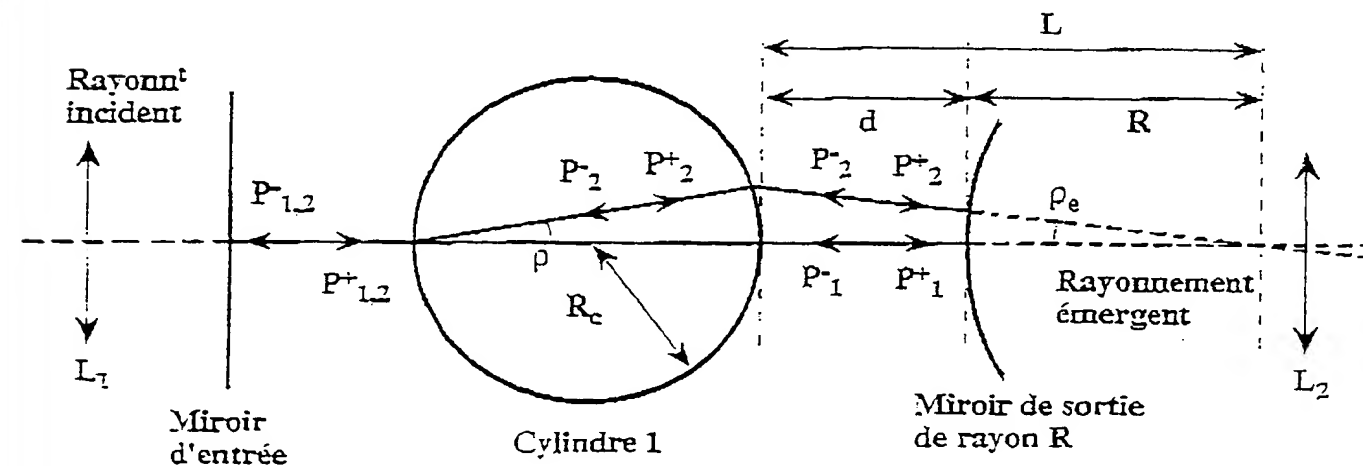


Figure 8



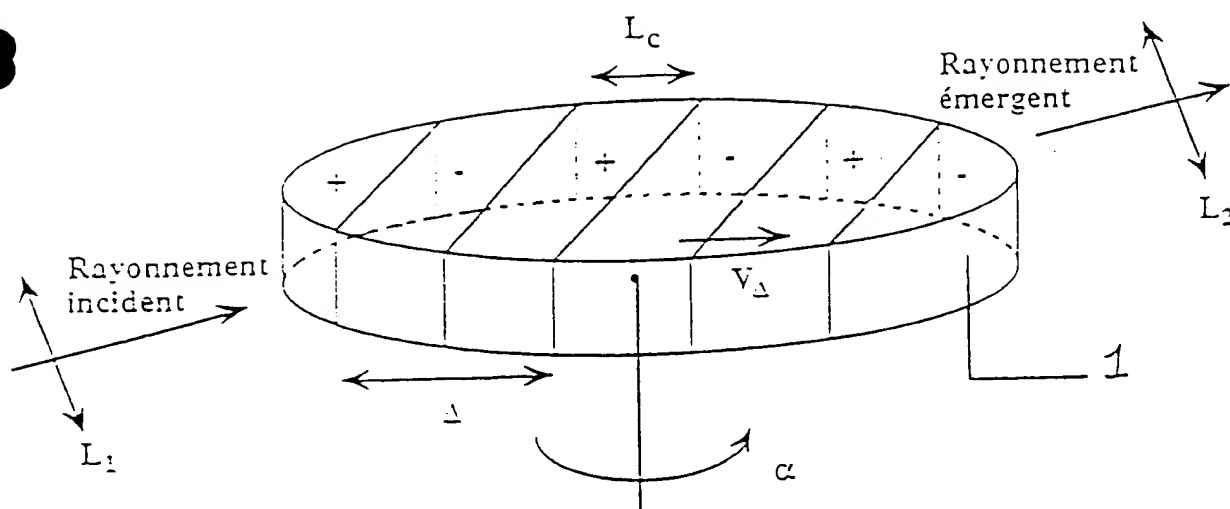


Figure 9

